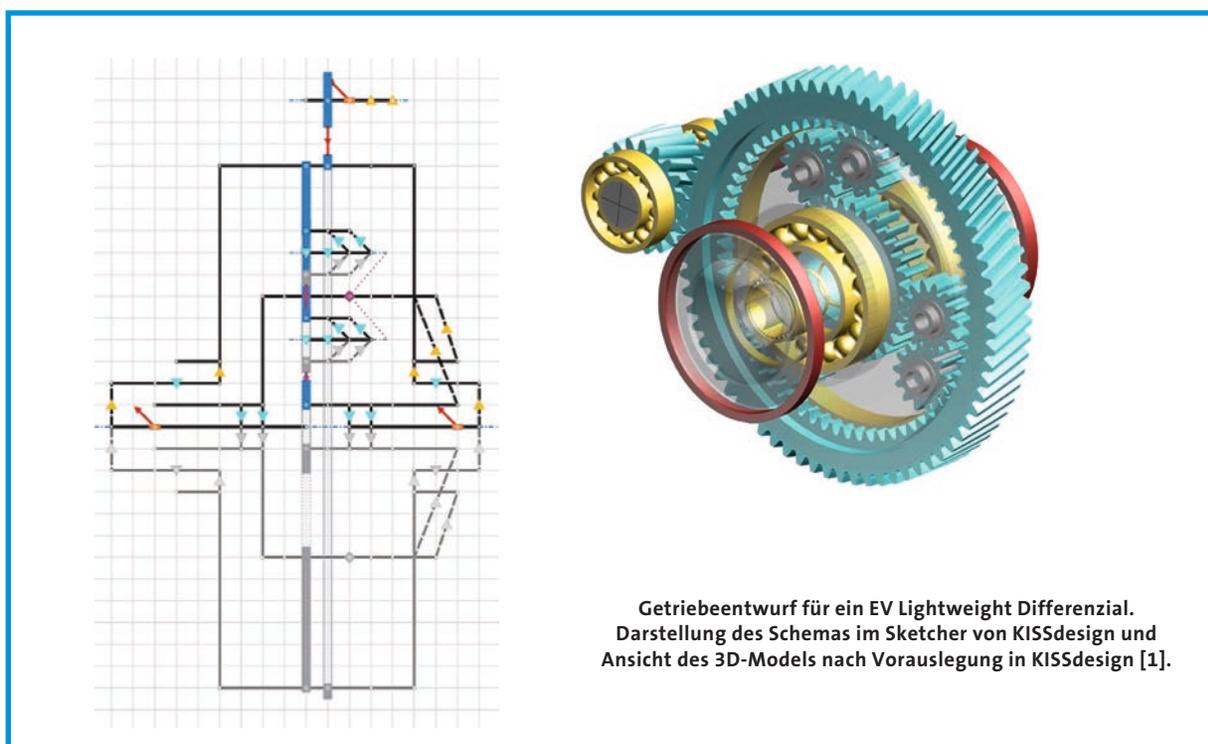


EINFLÜSSE AUF DIE NVH-PERFORMANCE BEI DER ZAHNRADAUSLEGUNG – TEIL 1

Die Geräusch-Emissionen von Zahnradgetrieben bei Elektrofahrzeugen sind ein großes Problem. Durch eine hohe Genauigkeit der verwendeten Zahnräder lässt sich bekanntlich sowohl die Lebensdauer erhöhen als auch die Vibrationsanregung, die sogenannte NVH (Noise-Vibration-Harshness) Performance, und damit das Geräusch verbessern. Viele EV-Hersteller schreiben deshalb für die Herstellung der Zahnräder eine hohe bis sehr hohe Qualität nach ISO 1328 vor.



Getriebeentwurf für ein EV Lightweight Differential.
Darstellung des Schemas im Sketcher von KISSdesign und
Ansicht des 3D-Modells nach Vorauslegung in KISSdesign [1].

In der Praxis wird insbesondere die Profil-Formabweichung sehr stark eingeschränkt. Teilweise werden hier Vorgaben gemacht, welche fast nicht mehr herstellbar sind, und dementsprechend die Zykluszeit und damit die Herstellkosten wesentlich erhöhen. Es stellt sich die Frage, ob die geforderte hohe Qualität überhaupt noch wesentliche Verbesserungen bringt, oder ob beispielsweise eine gut ausgelegte Profilmodifikation nicht mehr Wirkung zeigt als die reine Reduktion der zugelassenen Herstellabweichungen.

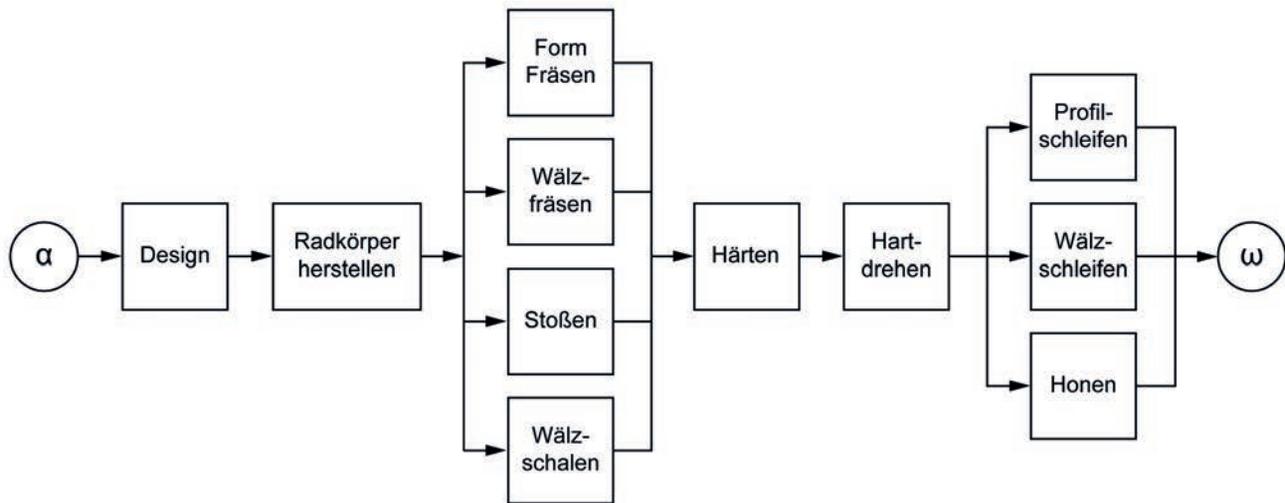
Es wäre deshalb sinnvoll, eine Methode zu finden, um den Einfluss der Herstellgenauigkeit abschätzen zu können. Die Auswertung der Profillinien bei Zahnradmessungen zeigt immer eine statistische Streuung des Signals, welcher meistens eine gewisse Grund-Welligkeit überlagert ist. Die Größe dieser Welligkeit beeinflusst direkt die resultierende Profil-Formabweichung.

Im Vortrag werden die Grundlagen und Ergebnisse eines Projekts beschrieben, mit welchem der Einfluss der Qualität auf den

resultierenden Drehwegfehler und die Kraftanregung abgeschätzt werden kann. Dazu wird auf die theoretisch ideale Zahnflanke eine sinusförmige Welligkeit aufgebracht. Die Welligkeit kann mit Amplitude, Länge und Anfangswert modifiziert werden. Diese Modifikation kann sowohl in Profil- als in Breitenrichtung oder kombiniert ausgeführt werden. Als Resultat wird die Veränderung von Drehwegfehler, Kraftanregung und anderer wesentlicher Einflüsse auf die Vibrationsanregung ausgewertet.

Die Amplitude oder Höhe der Welligkeit ergibt sich aus der über die gewählte Qualität zugelassenen maximalen Profil-Formabweichung f_{to} . Die Länge oder der Anfangswert der Welligkeit (ausgedrückt durch den Phasenwinkel der sinusförmigen Welligkeit) kann hingegen – je nach Situation bei der Fertigung – ohne Beeinflussung des f_{to} variieren. Deshalb muss die Streuung des Resultats bei unterschiedlicher Ausführung der Welligkeit berücksichtigt werden. Dies kann in einem automatisierten Ablauf

01 Der übliche Fertigungsablauf bei der Stirnradherstellung



gemacht werden, indem unterschiedliche Amplituden, Längen und Phasenwinkel kreuzvariiert werden. Durch eine Darstellung der auftretenden Änderung des Drehwegfehlers und anderer Größen über der Amplitude, respektive der zugelassenen Qualität, kann dann die Auswirkung der Qualität auf das NVH-Verhalten prognostiziert werden kann.

Die Anwendung dieser Methode auf einige Zahnräder aus aktuellen Getrieben wird dargestellt und diskutiert. Ein Vergleich mit der erreichbaren Verbesserung durch eine optimierte Profilmodifikation liefert interessante Erkenntnisse.

1 BERÜCKSICHTIGUNG DER FERTIGUNGSMETHODE BEI DER ZAHNRADAUSLEGUNG

1.1 GETRIEBEDSIGN UND ZAHNFLANKENMODIFIKATIONEN

Bei der Auslegung eines Getriebes wird auf Grund der Anforderungen wie Belastungen, Drehzahlen, Untersetzungen ein Getriebeschema erstellt. In einer Software für Antriebssysteme [1] kann ein solches Getriebeschema dann sehr effizient modelliert werden. Anschließend werden die Zahnräder, Wellen und Lager mit Auslegungsfunktionen dimensioniert. Damit erhält der Konstrukteur sehr schnell einen ersten Entwurf, welcher bereits die wesentlichen Anforderungen wie Mindestsicherheiten und/oder Lebensdauer erfüllt.

Nach einer möglichen Anpassung der Getriebedimensionen an räumliche und andere Randbedingungen wird eine statische und dynamische Simulation des Getriebes durchgeführt. Damit erkennt der Fachmann, welche Zahnflankenmodifikationen erforderlich sind, um Zahnschäden durch Verformung unter Last zu vermeiden. Sehr wichtig sind heute gezielte Modifikationen zur Minimierung von Vibrationsanregung (Geräusch!) oder Verlusten (Wirkungsgrad!). Solche Zahnflankenmodifikationen werden nach rein funktionalen Gesichtspunkten vorgenommen. Zumeist sind es Balligkeiten in Profil- und Zahn längsrichtung, die sicherstellen, dass für jeden Betriebspunkt des Getriebes ein akzeptabler Zahnkontakt vorliegt.

Es liegt in der Natur der Sache, dass Zahnflankenmodifikationen, die nach rein funktionalen Gesichtspunkten definiert werden, sich in der Regel nur näherungsweise herstellen lassen. So wird

es dann zur Aufgabe der Fertigung, diese funktionsorientierte Zahnflankenmodifikation so gut wie möglich anzunähern.

1.2 METHODEN ZUR ZAHNRADHERSTELLUNG

Zur Herstellung von Stirnrädern gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Herstellverfahren. Für die Weichbearbeitung stehen Verfahren wie Wälzfräsen, Formfräsen, Stoßen, Räumen oder Wälzschalen zur Verfügung. Für die Hartfeinbearbeitung ist die Verfahrensauswahl eingeschränkter. Hier gibt es als produktive Verfahren im Wesentlichen nur Wälzschleifen, Profilschleifen und Verzahnungshonen. Die Zahnradbearbeitung findet auf Basis der Werkzeuggeometrie und der Bearbeitungs-Kinematik statt, allerdings wird die Kinematik erst durch die Steuerung anhand der theoretischen Zahnrad Daten und der gewünschten Zahnflankenmodifikationen berechnet.

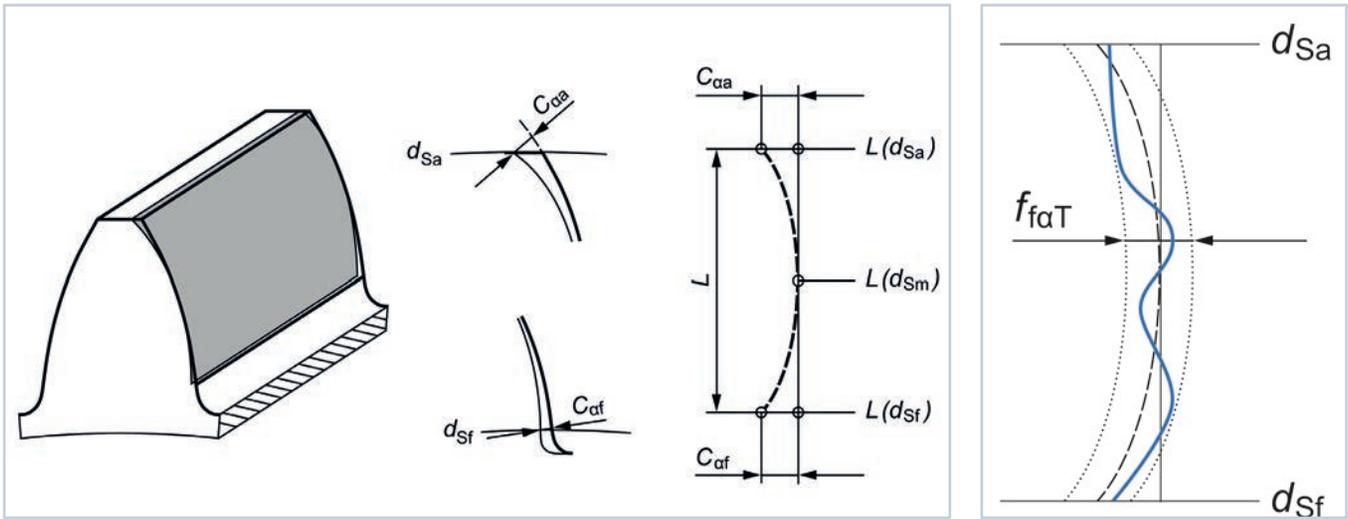
In den meisten Fällen erstellt die Konstruktionsabteilung ein Getriebedesign ohne wesentliche Absprache mit der Fertigung. Wird, wie heute üblich, Fertigungs-Outsourcing gemacht, ist für gewöhnlich während der Entwurfsphase auch noch nicht festgelegt wer und mit welcher Methode die Produktion der Zahnräder erfolgen wird.

1.3 EINBEZUG DER FERTIGUNGSMETHODIK IN DEN DESIGN-PROZESS

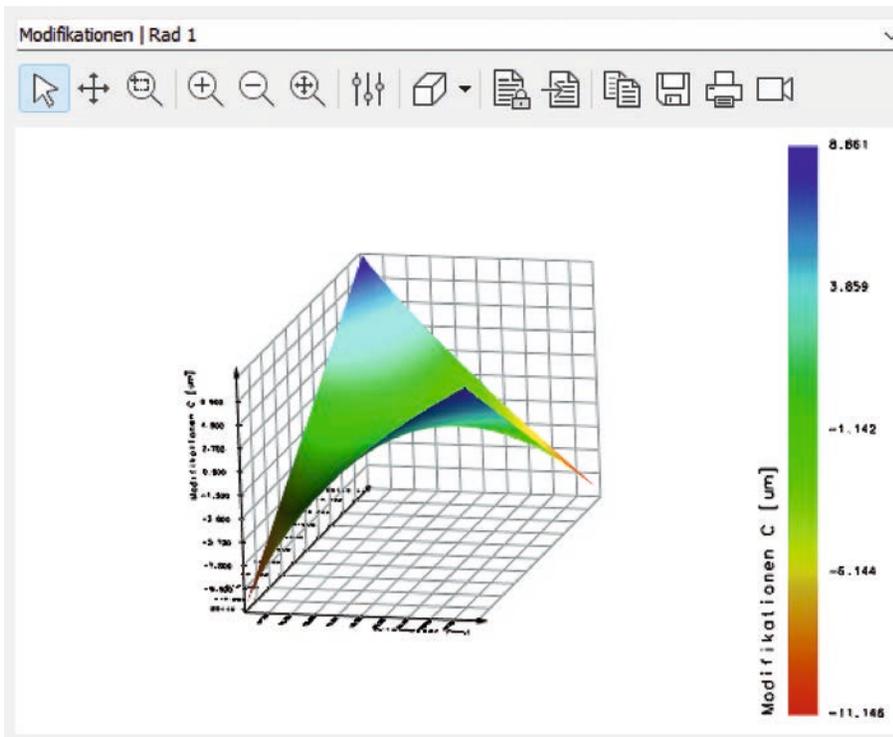
Jede Fertigungsmethode hat spezifische Eigenschaften, welche es erlauben gewisse Zahnflankenmodifikationen gut, passabel oder gar nicht auszuführen. Der Maschinenbediener in der Fertigung steht dann vor dem Problem, eine Modifikation herzustellen, die rein mathematisch so nicht herstellbar ist. Also behilft er sich mit einer mehr oder weniger guten Näherung an die gewünschte Modifikation. Gelingt es dann innerhalb der vorgegebenen Toleranz das Zahnrad herzustellen, ist er zufrieden. Fertigungsabweichungen werden bei der Kontrolle über die Profil- und Flankenlinienabweichungen geprüft. Dieses Verfahren ist nur bedingt geeignet, topologische Modifikationen zu beschreiben. Da die vorgegebenen Toleranzen auf groben Modellen beruhen, sind sie kein Garant für das Erreichen der Verzahnungseigenschaften, welche sich der Konstrukteur bei der Auslegung der Modifikationen vorgestellt hat.

Eine Profilform-Abweichung wird beispielsweise so bestimmt, dass die gewünschte Profilform, die in **Bild 02** gestri-

02 Bestimmung einer Profilformabweichung ff



03 Natürliche Herstellverschränkung (S_n 10.004 μm nach ISO 21771) beim Ausführen einer Breitenballigkeit (21.9 μm) im Wälzschleifverfahren; Berechnung in KISSsoft [1]



chelt dargestellt ist, so weit nach rechts und links verschoben wird, bis die gemessene Profilform, welche als dicke blaue Linie gezeigt ist, im Auswertebereich von den verschobenen Sollformen eingeschlossen wird. Der Betrag der Verschiebung nach links und rechts ist dann der Profilformfehler f_{fa} nach ISO 1328). Es ist offensichtlich, dass es unterschiedliche Profilformen gibt, die alle den gleichen Wert von f_{fa} haben. Welchen Einfluss so eine Abweichung auf das Lauf- und Geräuschverhalten einer Verzahnung hat, ist mit dieser Methodik nur unzulänglich zu bewerten. Dasselbe gilt für die Flankenlinienformabweichung [3].

1.4 BEISPIEL: NATÜRLICHER TWIST AUS BREITENBALLIGKEIT

Ein klassisches Beispiel ist die Ausführung einer Breitenballigkeit auf einer einfacheren Schleifmaschine. Beim Wälzschleifverfahren entsteht durch die Werkzeugbewegung bei Schrägverzahnungen eine Herstellverschränkung (Natürlicher Twist), der aus einer eigentlichen Verschränkung mit einer überlagerten kleinen Höhenballigkeit besteht. (Bild 03). Moderne Schleifmaschinen können den Herstelltwist kompensieren, einfachere Maschinen nicht. Dieser Twist kann das Trag- und Anregungsverhalten im Zahneingriff deutlich beeinflussen und ist im Normalfall uner-

wünscht. Andererseits wird bei Schrägverzahnungen in gewissen Fällen ein Flankentwist bewusst als Modifikation eingesetzt. Damit kann ein Herstelltwist nützlich sein. Wenn die Design-Software es erlaubt, den entstehenden Herstelltwist bei Eingabe einer Balligkeit zu berechnen und bei der Kontaktanalyse zu berücksichtigen, kann bereits bei der Auslegung die entstehende Herstellabweichung einbezogen werden. Damit vereinfacht sich der Schleifprozess deutlich und es ist einfacher die Sollkontur zu erreichen.

1.5 INTEGRATION VON FERTIGUNGS-KNOW-HOW IN DER ZAHNRADAUSLEGUNG

Wie oben besprochen ist es nützlich die Eigenschaften einer Herstellmethode bei der Auslegung der Verzahnungs-Geometrie und der Modifikationen zu berücksichtigen. Die Herstellmethode beeinflusst auch die Kosten und kann damit, gerade bei größeren Serien, von großer Bedeutung sein. Beispielsweise ist das Verzahnungshonen bei großen Serien eine kostengünstige Methode, kann aber nur bis ca. Modul 6 mm eingesetzt werden. Oder Wälzschälen kann im Vergleich zum Stoßen für das Herstellen von Verzahnungen sehr produktiv sein, aber eine Kontrolle muss erfolgen, ob Kollisionen zwischen Werkstück und Werkzeugschaft auftreten können.

Häufig ist es aber so, dass der Konstrukteur im Getriebedesign nicht genügend Kenntnisse von der Fertigung hat, um die Restriktionen der verschiedenen Verfahren zu beherrschen. Dies ist der Grund, weshalb seitens Kisssoft [1] das Bestreben besteht, Fertigungs-Know-how in die Auslegungssoftware einzubauen. Die Herausforderung hierbei ist, eine Prüfung der Anwendbarkeit einer bestimmten Methode zu machen ohne dass der Konstrukteur nach Angaben abgefragt wird, die er nicht kennt. Zum Beispiel beim Wälzfräsen eine Abfrage des Durchmessers des Werkzeugschafts. Die Entwicklung solcher Herstellprüfprogramme ist deshalb anspruchsvoll.

Da die Kisssoft AG seit einigen Jahren im Gleason-Konzern [2] eingegliedert ist, haben sich hier ganz neue Möglichkeiten erge-

ben. Gleason weltweit aktiv bei der Herstellung von Verzahnungsmaschinen und Werkzeugen und verfügt damit innerhalb des Konzerns über ein bedeutendes und breites Know-how.

Bilder: Kisssoft AG

www.kisssoft.com

Literaturverzeichnis:

- [1] KISSsoft & KISSdesign: www.kisssoft.ag
- [2] Gleason Corporation: www.gleason.com/de
- [3] Müller, H.: *Fertigungssimulation als Basis für Industrie 4.0*, Schweizer Maschinenelemente Kolloquium, 2018
- [4] Sundar, S.; Singh, R.; Jayasankaran, K.; Ohio State University: *Effect of the Tooth Surface Waviness on the Dynamics and Structure-Borne Noise of a Spur Gear Pair*. SAE International Journal of Passenger Cars. 2013
- [5] Malburg, M.; Zecchino, M.: *Understanding and Controlling the Source of Gear Noise*. Gear Technology, August 2021.
- [6] Heider, M.K.: *Schwingungsverhalten von Zahnradgetrieben*. Dissertation TU München. 2012
- [7] Radev, S.: *Einfluss von Flankenkorrekturen auf das Anregungsverhalten gerad- und schrägverzahnter Stirnradpaarungen*. Dissertation TU München. 2006
- [8] ISO 1328-1; *Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification – Part 1*, 2013. (Identisch mit ISO DIN 1328-1.)

DER AUTOR

Ulrich Kissling,
Dr. Ing. ETH, KiSSsoft AG,
Bubikon, Schweiz

Der Beitrag wird in der Ausgabe
antriebstechnik 11/2022 fortgesetzt.